

Wojciech SIKORSKI, Hubert MORAŃDA
POLITECHNIKA POZNAŃSKA, INSTYTUT ELEKTROENERGETYKI,
ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań

Lokalizacja źródeł wyładowań niezupełnych w transformatorach energetycznych metodą emisji akustycznej i konwencjonalną metodą elektryczną

Dr inż. Wojciech SIKORSKI

Adiunkt w Instytucie Elektroenergetyki Politechniki Poznańskiej. Autor ponad 40 publikacji oraz zgłoszenia patentowego z zakresu diagnostyki transformatorów energetycznych. Specjalizuje się w detekcji, identyfikacji i lokalizacji defektów wysokonapięciowych układów izolacyjnych. Współtwórca systemu monitoringu on-line wyładowań niezupełnych w transformatorach energetycznych.



e-mail: wojciech.sikorski@put.poznan.pl

Dr inż. Hubert MORAŃDA

Adiunkt w Zakładzie Wysokich Napięć i Materiałów Elektrotechnicznych Politechniki Poznańskiej. Autor ponad 70 publikacji z zakresu badań materiałowych oraz diagnostyki wysokonapięciowych układów izolacyjnych. Współtwórca systemu monitoringu on-line wyładowań niezupełnych w transformatorach energetycznych.



e-mail: hubert.moranda@put.poznan.pl

Streszczenie

W pracy przedstawiono problematykę lokalizacji źródeł wyładowań niezupełnych (wnz) występujących w transformatorach energetycznych. W celu poprawy skuteczności lokalizacji, autorzy proponują równoczesne wykorzystanie konwencjonalnej metody elektrycznej oraz metody emisji akustycznej. W pracy zaprezentowano przykład lokalizacji wyładowań w transformatorze badanym na stacji prób oraz w transformatorze badanym w miejscu zainstalowania (stacja elektroenergetyczna).

Słowa kluczowe: diagnostyka transformatorów energetycznych, lokalizacja źródeł wyładowań niezupełnych, emisja akustyczna, metoda elektryczna pomiaru wyładowań niezupełnych.

Location of partial discharge sources in power transformers with use of the conventional electrical and acoustic emission method

Abstract

The paper describes the issues of efficient location of partial discharge (PD) sources occurring in power transformer subjected to the long-duration induced AC voltage test (ACLD). This kind of tests are carried out in a factory-owned high voltage laboratory. Due to that, simultaneous use of the conventional electrical and acoustic emission method is possible. Additionally, the authors present the measurements results obtained with use of the innovative and fully integrated electrical/acoustic method for partial discharge location. In this method the results of measurement are presented as the acoustic maps (intensity graphs of mean amplitude or energy of registered acoustic emission pulses) applied to the transformer tank image. The second part of the paper describes the example of application of this method to PD location in a power transformer installed in a high-voltage substation (on-site measurements). The example confirmed usefulness of the proposed method to achieve a quick location of transformer insulation defects.

Keywords: power transformer diagnostics, partial discharge source location, acoustic emission, electrical method of partial discharge measurement.

1. Wprowadzenie

Zgodnie z PN-EN 60076-3 [1] transformatory nowe i zmodernizowane powinny charakteryzować się poziomem ładunku pozornego wyładowań niezupełnych (wnz) nieprzekraczającym 500 pC (w transformatorach już eksploatowanych zarządzający mieniem sieciowym dopuszczają wyższe wartości, rzędu kilku nC). W sytuacji, gdy warunek ten nie jest spełniony, bardzo ważna jest lokalizacja źródła wnz. W tym celu autorzy proponują równoczesne wykorzystanie metody emisji akustycznej (EA) oraz konwencjonalnej metody elektrycznej.

Metoda elektryczna pozwala na ciągły pomiar ładunku pozornego wyładowań oraz wskazanie fazy transformatora, w której występuje defekt. Z kolei zmodyfikowana i ulepszona przez autorów technika lokalizacji źródła wnz, głównie dzięki równoczesnemu wykorzystaniu metody elektrycznej i EA, minimalizuje potencjalne błędy wynikające przede wszystkim z nierównomiernego wytłumienia sygnałów akustycznych, zwłaszcza wtedy, gdy sygnały w drodze do przetwornika przenikają przez ośrodki niejednorodne.

2. Lokalizacja wnz w transformatorze badanym w wysokonapięciowej stacji prób

2.1. Obiekt badań i zastosowane układy pomiarowe

Badaniom poddano transformator typu TR 16000/110, wyprodukowany w 1972 r. przez łódzkie zakłady ELTA. Pod koniec 2009 r. transformator został przekazany firmie Power Engineering S.A. w celu wykonania prac modernizacyjnych. Zakres tych prac obejmował: wykonanie kompletu nowych uzwojeń, zmianę grupy i układu połączeń z YNyn0 na YNd11, wymianę oleju, zainstalowanie nowych radiatorów (realizacja chłodzenia w układzie ONAN), wymianę podobiążeniowego przełącznika zaczeń, wraz z napędem, oraz wymianę izolatorów przepustowych GN i punktu zerowego.

2.2. Lokalizacja wnz konwencjonalną metodą elektryczną

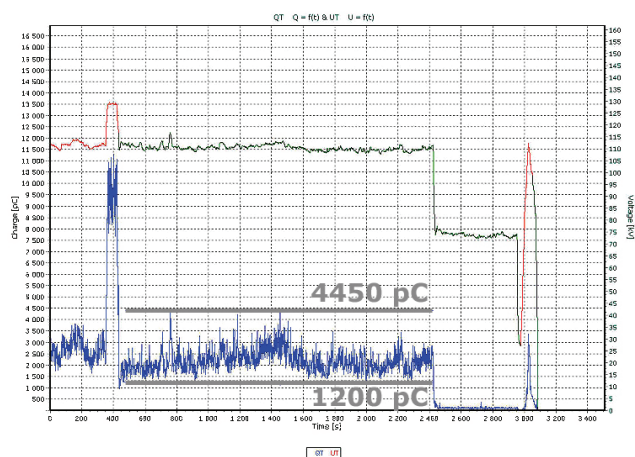
Detekcję wnz metodą elektryczną konwencjonalną przeprowadzono zgodnie z PN-EN 60270 [2].

Konwencjonalna metoda elektryczna znajduje zastosowanie głównie w laboratorium i w stacjach prób producentów transformatorów, choć przy spełnieniu pewnych warunków, możliwe jest jej wykorzystanie w miejscu zainstalowania transformatorów [3, 4]. Metoda ta charakteryzuje się wysoką czułością (w warunkach laboratoryjnych nawet od 0,01 pC) oraz umożliwia badanie różnych parametrów związanych z intensywnością wyładowań niezupełnych.

Podczas badań transformatora znajdującego się w stacji prób wykorzystano układ pomiarowy PD-Smart firmy Doble Lemke. Detekcja wyładowań niezupełnych występujących w badanym transformatorze prowadzona była w przyfabrycznym, częściowo ekranowanym, laboratorium wysokonapięciowym, zapewniającym niski (od kilku do kilkunastu pC) poziom zakłóceń.

Transformator po zakończeniu prac modernizacyjnych poddano długotrwałej próbie napięciem przemiennym indukowanym (ACLID) zgodnie z PN-EN 60076-3. Każda z faz transformatora badana była oddzielnie w układzie jednofazowym. W trakcie próby napięciem indukowanym uzwojenia były uziemiane poprzez zacisk neutralny źródła napięcia zasilającego.

Rysunek 1 przedstawia wynik detekcji wyładowań niepełnych w fazie 1A. Ponieważ podczas próby poziom ładunku pozornego wyładowań niepełnych przekraczał dopuszczalną wartość 500 pC jej wynik uznano za negatywny.



Rys. 1. Wynik detekcji wyładowań niepełnych konwencjonalną metodą elektryczną w trakcie długotrwałej próby napięciem przemiennym indukowanym fazy 1A badanego transformatora

Fig. 1. The result of PD detection with use of the conventional electrical method during long-duration induced AC voltage test for phase 1A of the investigated power transformer

2.3. Lokalizacja wnz metodą emisji akustycznej

Głównym zastosowaniem metody emisji akustycznej, stanowiącym przy tym jej największą zaletę, jest możliwość dość precyzyjnej lokalizacji źródła wyładowań niepełnych.

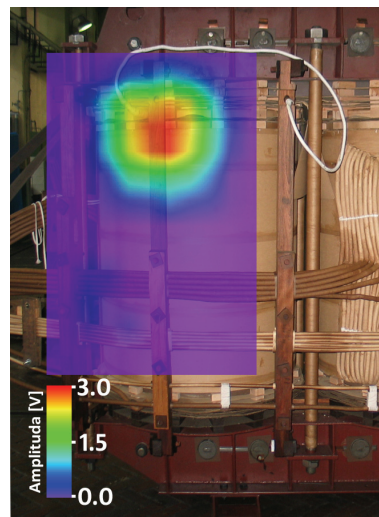
Najpopularniejsze techniki lokalizacji oparte są na: (i) pomiarze czasu opóźnienia, z jakimi impulsy EA generowane przez wnz docierają do przetworników rozmieszczonych na kadzi transformatora, (ii) pomiarze amplitudy rejestrowanych impulsów EA, (iii) oszacowaniu kierunku nadejścia sygnału EA rejestrowanego przy wykorzystaniu macierzy przetworników [5].

Ze względu na czas pomiaru, ograniczony czasem trwania próby napięciem indukowanym, do lokalizacji źródła wyładowań niepełnych zdecydowano się wykorzystać metodę opartą na pomiarze amplitudy rejestrowanych sygnałów EA (zwaną metodą osłuchową lub metodą największej głośności) [6]. Najbardziej wiarygodne i precyzyjne wyniki lokalizacji tą metodą można uzyskać, gdy spełniona jest większość następujących warunków: (i) równocześnie prowadzony jest pomiar ładunku pozornego metodą elektryczną, (ii) na podstawie pomiaru metodą elektryczną znana jest faza transformatora, w której znajduje się defekt generujący wnz, (iii) poziom ładunku pozornego wnz jest stabilny, (iv) wyładowania są niegasnące, (v) przetworniki mocowane są ze stałą siłą docisku, na przykład przy użyciu magnetycznych uchwytów oraz zapewnione jest dobre sprzężenie akustyczne przetworników z powierzchnią kadzi, (vi) znane są szczegóły konstrukcyjne badanego transformatora [7, 8].

W przypadku pomiarów prowadzonych na badanym transformatorze wszystkie wyżej wymienione warunki były spełnione. Dodatkowo, w celu poprawy dokładności lokalizacji, autorzy zmodyfikowali standardową procedurę metody największej głośności. Zmodyfikowana i udoskonalona technika lokalizacji składa się z następujących etapów:

- 1) wybór punktów pomiarowych na kadzi transformatora, w taki sposób, aby tworzyły one siatkę pomiarową w kartezjańskim układzie współrzędnych,
- 2) wyznaczenie dla każdego punktu z siatki pomiarowej wartości średniej kroczącej amplitudy (lub energii) rejestrowanych sygnałów EA do momentu osiągnięcia liniowego trendu,
- 3) obliczenie, na podstawie pomiaru wartości ładunku pozornego wyładowań niepełnych, skorygowanej wartości średniej kroczącej amplitudy (lub energii) rejestrowanych sygnałów EA,
- 4) wizualizacja otrzymanych wyników w postaci *mapy akustycznej* oraz naniesienie jej na schemat konstrukcyjny bądź zdjęcie badanego transformatora.

Tak zmodyfikowana, zintegrowana elektryczno-akustyczna metoda największej głośności, doskonale nadaje się do pomiarów prowadzonych na transformatorach poddanych próbie napięciowej. Dzięki równoczesnemu zastosowaniu metody elektrycznej i emisji akustycznej możliwe jest szybkie, a przy tym dość precyzyjne, wskazanie miejsca, w którym znajduje się defekt. Na rysunku 2 przedstawiono wynik lokalizacji źródła wyładowań w fazie 1A badanego transformatora.



Rys. 2. Wynik lokalizacji źródła wyładowań niepełnych przedstawiony w postaci *mapy akustycznej* naniesionej na zdjęcie fragmentu części aktywnej badanego transformatora (faza 1A)

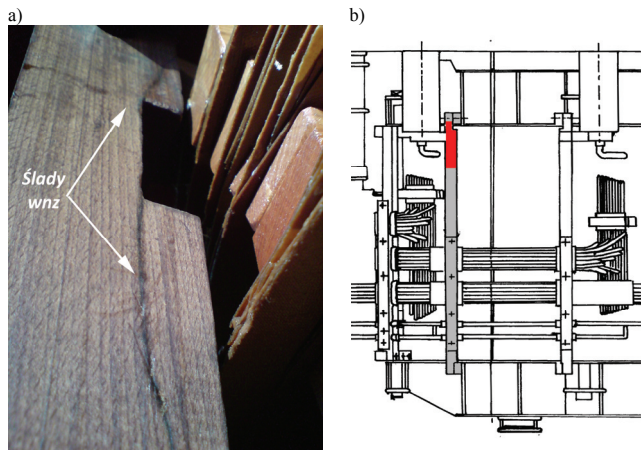
Fig. 2. The result of PD source location presented as an acoustic map marked on the photo of the investigated power transformer active part (phase 1A)

Na podstawie analizy mapy akustycznej oraz fotografii układu izolacyjnego części aktywnej transformatora przyjęto hipotezę, że defekt generujący wnz znajduje się w izolacji odpływów (w pobliżu połączenia uzwojeń z zaciskami przepustów) lub w wykonaniu z drewna bukowego trzymaczu odpływów.

2.4. Wyniki rewizji wewnętrznej badanego transformatora

Rewizja wewnętrzna transformatora potwierdziła obecność defektu w układzie izolacyjnym. Na powierzchni trzymacza odpływów znaleziono wyraźne ślady erozji w postaci zwęglonych ścieżek wywołanych działaniem wysokoenergetycznych wnz (rys. 3).

Analiza rozkładu natężenia pola elektrycznego tego fragmentu układu izolacyjnego wykazała, że przyczyną generowania się wyładowań niepełnych był prawdopodobnie zbyt mały odstęp pomiędzy trzymaczem odpływów a uzwojeniami. Po wykonaniu prac modernizacyjnych, polegających na zmianie położenia trzymacza odpływów, a tym samym zapewnieniu właściwych odstępów izolacyjnych, transformator ponownie poddano próbie napięciowej. Pomiarzy wykazały, że ustabilizowany poziom wyładowań niepełnych nie przekraczał wartości 500 pC, w rezultacie czego transformator przeszedł próbę z wynikiem pozytywnym.



Rys. 3. Wyniki rewizji wewnętrznej transformatora: a) ślady erozji na powierzchni trzymacza odpływów, b) schemat konstrukcyjny, na którym zaznaczono trzymacz odpływów i obszar występowania wyładowań niepełnych

Fig. 3. The result of internal revision of the power transformer: a) signs of erosion on the pressboard supporting beam surface b) schematic design with marked supporting pressboard beam and area of PD occurrence

3. Lokalizacja wnz w transformatorze badanym na stacji elektroenergetycznej

3.1. Obiekt badań

Badaniom poddano transformator typu RTdXP 125000/220, wyprodukowany w 1978 r. przez łódzkie zakłady ELTA. Transformator był w ruchu. Powodem przeprowadzenia badań wyładowań niepełnych był niepokojący wzrost ilości gazów palnych, zwłaszcza wodoru, który rozpoczął się po przepłynięciu przez ten transformator prądu zwarciovego, którego przyczyną była awaria linii WN. Wykonane w 2009 roku badanie metodą SFRA wskazało na możliwość powstania odkształcenia uzwojeń DN i wyrównawczego.

3.2. Lokalizacja wnz konwencjonalną metodą elektryczną

Badania wyładowań niepełnych metodą elektryczną obejmowały pomiar ich ładunku pozornego, zgodnie z wymaganiami normy IEC 60270. Pomiary zostały przeprowadzone dla wszystkich faz transformatora, po stronie 110 kV oraz 220 kV. Do pomiarów wykorzystano odczepy pomiarowe izolatorów przepustowych.

Procedura pomiarowa składała się z następujących czynności:

- 1) wyłączenie transformatora,
- 2) podłączenie impedancji pomiarowej do złącza pomiarowego w przepuście,
- 3) kalibracja układu pomiarowego impulsami wzorcowymi,
- 4) włączenie transformatora do ruchu i pomiar wnz.

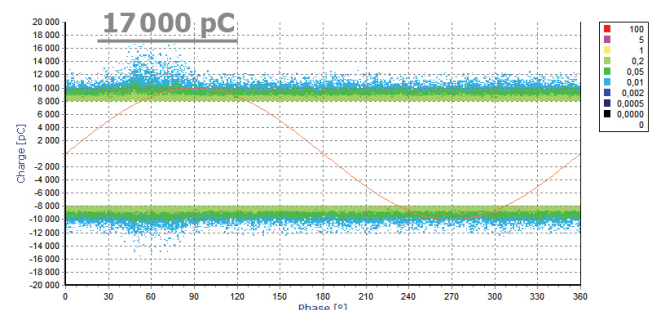
Tablica 1 przedstawia wyniki pomiarów. Brak danych w drugiej kolumnie oznacza, że jeśli wnz były generowane to ich ładunek był mniejszy od poziomu zakłóceń. Przykładowy rozkład fazowy impulsów wnz dla fazy 1B (strona 220 kV) przedstawia rysunek 4.

Wyniki pomiarów wyładowań niepełnych metodą elektryczną wykazały obecność silnych wnz w fazie 1B transformatora, po stronie 220 kV. Wartość ładunku pozornego tych wyładowań osiągała 17 nC, natomiast zakres kąta fazowego, w którym się pojawiały, zawierał się w przedziale (30-90)°. W pozostałych fazach strony 220 kV (1A i 1C) również rejestrowano impulsy wnz, ale ich ładunek był mniejszy. Zakres kąta fazowego tych impulsów był identyczny jak to miało miejsce w przypadku fazy 1B, co pozwoliło wnioskować, że w pozostałych fazach rejestrowano wyładowania niepełne pochodzące z tego samego źródła. Po stronie 110 kV zarejestrowano wnz tylko w fazie 1C.

Tab. 1. Wartość maksymalna ładunku pozornego impulsów wnz zarejestrowanych podczas pomiarów

Tab. 1. Maximal values of PD apparent charge registered during measurements

Badana faza transformatora	Poziom ładunku pozornego wnz, nC
1A	10
1B	17
1C	11
2A	-
2B	0,8
2C	-



Rys. 4. Rozkład amplitudowo-fazowy impulsów wnz rejestrowanych w fazie 1B

Fig. 4. Pattern of PD pulses recorded for phase 1B

3.3. Lokalizacja wnz metodą emisji akustycznej

W oparciu o wyniki uzyskane konwencjonalną metodą elektryczną, procedurę lokalizacji źródeł wyładowań niepełnych zdecydowano się ograniczyć wyłącznie do fazy 1B (220 kV).

Brak ograniczeń czasowych na wykonywanie pomiarów, jak również możliwość ciągłego monitorowania poziomu ładunku pozornego umożliwiły wykonanie lokalizacji wnz metodą EA, zarówno zintegrowaną elektryczno-akustyczną techniką osłuchową, jak i triangulacyjną.

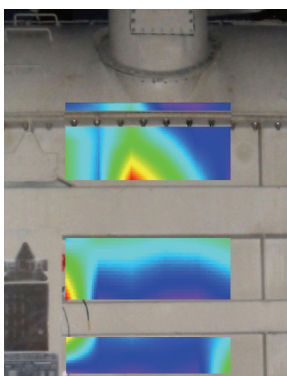
W przypadku techniki osłuchowej, w pierwszej kolejności wybrano i oznaczono miejsca na kadzi, które utworzyły siatkę pomiarową. W celu zwiększenia wiarygodności pomiarów i ułatwienia interpretacji uzyskanych wyników, celowo pominięto miejsca, w których ścianki kadzi mają większą grubość (karby wzmacniające wytrzymałość mechaniczną, miejsca spawów itp.). Siatka pomiarowa składała się z 36 punktów. W trakcie pomiarów w każdym punkcie rejestrowano minimum 5000 impulsów emisji akustycznej, dla których następnie wyznaczano średnią kroczącą ich energii i amplitudy. Na podstawie otrzymanych wartości tych parametrów sporządzono mapy akustyczne, które zostały następnie nałożone na obraz kadzi badanego transformatora.

Analiza obrazu mapy akustycznej wykazała, że w fazie 1B badanego transformatora występują dwa źródła wyładowań niepełnych (rys. 5).

Po zakończonych pomiarach zintegrowaną metodą elektryczno-akustyczną przystąpiono do lokalizacji źródeł wnz techniką triangulacyjną. Punkty na kadzi transformatora, w których były mocowane cztery przetworniki EA, wtypowano na podstawie wyników uzyskanych techniką osłuchową. Rozmieszczenie przetworników w obszarach kadzi, w których rejestrowano impulsy o największej amplitudzie, miało na celu poprawę dokładności oszacowania współrzędnych defektu generującego wyładowania niepełne. Rozumowanie takie wynika z założenia, że punkty o największej głośności znajdują się teoretycznie najbliżej źródeł wnz.

Wyniki uzyskane techniką triangulacyjną potwierdziły istnienie tylko jednego źródła wyładowań (rys. 6), niemniej jego współrzędne, rzutowane na płaszczyznę XZ, tj. na ścianę kadzi transformatora strony GN, zawierają się w wykrytym techniką osłuchową obszarze o największej głośności (porównaj z rys. 5).

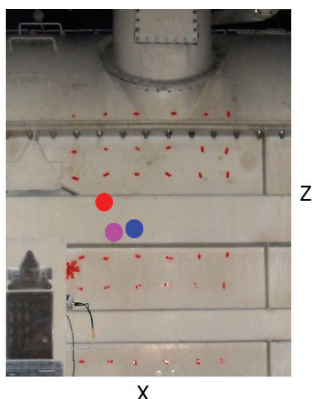
Analiza wyników triangulacji przedstawionych w trójwymiarowym układzie współrzędnych wykazała, że źródła wnz znajdują się w pobliżu osi symetrii izolatora przepustowego fazy 1B, w bliskim sąsiedztwie kadzi transformatora (rys. 7). Dlatego też, według jednej z kilku sformułowanych hipotez, wnz są generowane w izolacji znajdujących się w tym miejscu odpływów uzwojeń lub w ich belkach wsporczych (tzw. trzymaczach odpływów). Jednakże skuteczność lokalizacji źródeł wnz potwierdzi ostatecznie dopiero, planowana na następny rok, rewizja wewnętrzna transformatora.



Rys. 5. Wynik lokalizacji źródeł wyładowań niepełnych przedstawiony w postaci

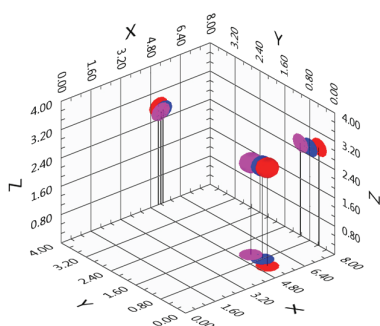
mapy akustycznej naniesionej na zdjęcie fazy 1B badanego transformatora

Fig. 5. The result of PD source location presented as an acoustic map marked on the photo of the investigated power transformer 1B phase



Rys. 6. Wyniki lokalizacji źródeł wyładowań niepełnych uzyskane techniką triangulacyjną (rzut współrzędnych na płaszczyznę XZ)

Fig. 6. The result of the PD source location obtained with use of the triangulation method (projection of coordinates in the XZ plane)



Rys. 7. Wyniki lokalizacji źródeł wyładowań niepełnych uzyskane metodą triangulacyjną przedstawione w układzie współrzędnych XYZ (płaszczyzna XZ obrazuje w tym przypadku ścianę kadzi od strony GN)

Fig. 7. The result of the PD source location obtained with use of the triangulation method presented in the XYZ coordinates system (the XZ plane illustrates in this case the tank wall from the side of HV)

4. Podsumowanie i wnioski

W przypadku transformatorów poddanych próbom napięciowym, w celu zwiększenia skuteczności detekcji, identyfikacji i lokalizacji źródeł wnz zaleca się wykonywanie równocześnie pomiarów przy użyciu konwencjonalnej metody elektrycznej i metody emisji akustycznej. Jak wykazały wyniki dotychczasowych badań przeprowadzonych na transformatorach poddanych długotrwałym próbom napięciowym, dzięki zastosowaniu zintegrowanej elektryczno-akustycznej metody pomiaru wyładowań niepełnych, możliwe jest zminimalizowanie czasu potrzebnego do detekcji, identyfikacji i lokalizacji defektu.

W przypadku transformatorów rozdzielczych, w sytuacji, gdy planowane są ich krótkotrwałe wyłączenia z ruchu, możliwe staje się wtedy przeprowadzenie badań wyładowań niepełnych zintegrowaną metodą elektryczno-akustyczną. Pewną przeszkodą może stanowić wtedy konieczność wielokrotnego wyłączenia transformatora na czas potrzebny do kalibracji i instalacji układu pomiarowego do detekcji wnz metodą elektryczną. Dodatkowym problemem może być również wysoki poziom zakłóceń zewnętrznych na terenie stacji elektroenergetycznej. W takiej sytuacji jedyną możliwością detekcji i lokalizacji wnz jest zastosowanie wyłącznie metody emisji akustycznej. Próbę przybliżonego oszacowania energii wyładowań, a tym samym ocenę skali zagrożeń, dokonuje się wtedy w oparciu o wyniki uzyskane podczas laboratoryjnych badań modelowych i badań terenowych transformatorów w miejscu ich zainstalowania.

5. Literatura

- [1] PN-EN 60076-3:2001 Transformatory. Część 3: Poziomy izolacji, próby wytrzymałości elektrycznej i zewnętrzne odstępki izolacyjne w powietrzu. PKN, 2001.
- [2] PN-EN 60270:2003 Wysokonapięciowa technika probiercza - Pomiar wyładowań niepełnych. PKN, 2003.
- [3] Tenbohlen S., Pfeffer A., Coenen S.: On-site experiences with multi-terminal IEC PD measurements, UHF PD measurements and acoustic PD localisation, IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Anaheim, Canada, 2-5. April 2010.
- [4] Kreate A., Rethmeier K., Krüger M., Winter P.: Synchronous multi-channel PD measurements and the benefits for PD analyses, IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Smart Solutions for a Changing World, New Orleans, USA, 19-22 April, 2010.
- [5] Markalous S.M., Feser K.: All-acoustic PD measurements of oil/paper-insulated transformers for PD-localization, Scientific Papers of the Institute of Electrical Engineering Fundamentals of Wrocław Technical University Conferences (40), pp. 106-112, 2004.
- [6] Skubis J.: Emisja akustyczna w badaniach izolacji urządzeń elektroenergetycznych. IPPT-PAN, Warszawa, 1994.
- [7] Sikorski W., Morańda H., Bródka B., Neumann R.: Detekcja, identyfikacja i lokalizacja źródeł wyładowań niepełnych w transformatorze energetycznym. Przegląd Elektrotechniczny 11b'2010
- [8] Sikorski W., Staniek P., Siodła K.: The influence of pressboard barriers on acoustic emission signal generated by partial discharges in a power transformer, Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering, No. 56, 2007.

otrzymano / received: 18.01.2011

przyjęto do druku / accepted: 01.03.2011

artykuł recenzowany